



Proposta de uma Metodologia de Tratamento de Fundação de uma Barragem de Concreto e seus Efeitos na Análise de Subpressão

Marieli B. Lopes
UFOP, Ouro Preto, Brasil, marybiondo@hotmail.com

André P. Assis
UnB, Brasília, Brasil, aassis@unb.br

Marlusa C. Schafer
Unochapecó, Chapecó, Brasil, marlusacristina@unochapeco.edu.br

Camila G. Carraro
Unochapecó, Chapecó, Brasil, caami_carraro@unochapeco.edu.br

RESUMO: As cortinas de injeção e os sistemas de drenagem são uma alternativa na redução do efeito da subpressão nas bases de barragens de concreto e melhoramento das condições hidráulicas e mecânicas do maciço rochoso. Este trabalho propõe um tratamento de fundação com redução dos furos de injeção e aumento do sistema de drenagem, adotando a metodologia GIN para execução da impermeabilização. Este sistema reduziu 30% nos custos das cortinas de injeção, além de diminuir 10% da subpressão na base do vertedouro da UHE Jirau. Os critérios de dimensionamento de subpressão utilizados foram de Andrade (1988) e Eletrobrás (2003). Em relação à adoção do método GIN para serviços de vedação e impermeabilização de fundações, sugere-se que seja aprofundado tanto os estudos, como a utilização, continuando o que já fora indicado por Oliveira *et al.* (2001), que um sistema de monitoramento em tempo real dos serviços, unificado com o GIN possuem vantagens e benefícios no controle da eficiência.

PALAVRAS-CHAVE: Subpressão, Cortina de Injeção, Sistema de Drenagem, Método GIN.

1 INTRODUÇÃO

A subpressão é um esforço no sentido de baixo para cima que age em sentido oposto ao efeito do peso próprio da estrutura de concreto e aumenta a instabilidade desta estrutura em relação ao tombamento e deslizamento. Segundo Andrade (1988), o estudo dos efeitos da subpressão foram iniciados em 1888 por Franciss, que foi o primeiro também a introduzir os sistemas de drenagem nas fundações para redução desta força.

Para melhoramento das condições das fundações de barragens de concreto, utilizam-se os tratamentos profundos, compostos por

cortinas de injeção com calda de cimento e drenagem vertical. As cortinas de injeção funcionam na redução das vazões pela fundação, devido ao aumento do caminho de escoamento. Em maciços rochosos muito fraturados, a penetração da calda auxilia no enrijecimento da fundação, aumentando os parâmetros de resistência mecânica, além dos parâmetros de condutividade hidráulica.

Os furos de drenagem agem diretamente no efeito de subpressão, por reduzir a área do diagrama formado abaixo da base da estrutura de concreto. Assim, com a redução desta área, há a redução da resultante das forças de água, que é a subpressão. Comumente, utilizam-se



tanto as cortinas de injeção, como os furos de drenagem nos projetos hidrelétricos, mesmo que as discussões sobre a necessidade destas cortinas de injeção sejam polemizadas desde 1932, por Terzaghi (COSTA, 1991). Das metodologias existentes e praticadas na execução dos furos impermeabilizantes, destacam-se o método convencional de Houlby (1990) e GIN (LOMBARDI; DEERE, 1993).

Este trabalho tem por finalidade propor um tratamento de fundação otimizado para o vertedouro da UHE Jirau, com redução de furos de injeção e aumento do sistema de drenagem. Esta proposta utilizará o método GIN para injeção, com avaliação de custos provenientes da redução dos furos da cortina. Com o sistema de drenagem, será verificada a eficiência em relação à subpressão, adotando o critério da Eletrobrás (2003) e de Andrade (1988).

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 Características Hidráulicas dos Maciços Rochosos

Segundo Costa (2012), a permeabilidade dos maciços formados por rochas ígneas é determinada pelo fluxo de suas descontinuidades, uma vez que não há poros neste tipo de material. Cruz (2004) apresenta magnitudes de coeficientes de permeabilidade para diferentes materiais, em que rochas intactas atingem $k = 10^{-10}$ cm/s, enquanto que em fraturas com aberturas de 0,5 mm, a condutividade é $k = 10^1$ cm/s.

Nos maciços fraturados, o escoamento é governado pelas descontinuidades principais, denominadas por Andrade (1988) de fraturas portadoras d'água. Assim, o autor afirma que o conhecimento desta família é mais importante no estudo de fluxos, que a determinação da interconectividade do maciço.

O escoamento nos granitos tende à zero em profundidade devido o confinamento, atingindo magnitudes maiores nos primeiros metros, em

que as juntas de alívio estão presentes (AZEVEDO; ALBUQUERQUE FILHO, 1998). O fluxo de fluidos por um meio permeável foi condicionado por Darcy, em 1856, determinando que a velocidade de escoamento é proporcional ao seu coeficiente de permeabilidade e gradiente hidráulico (FIORI, WANDRESEN, 2012):

$$v = ki \quad (1)$$

A Lei de Darcy é válida somente para fluxos laminares, e a sua limitação é o número de Reynolds, dado pela Equação 2, em que v é a velocidade do escoamento, e a espessura da descontinuidade portadora d'água e μ a viscosidade cinemática do fluido.

$$Re = \frac{v2e}{\mu} \quad (2)$$

Uma vez que o escoamento do maciço rochoso acontece pelas descontinuidades, a condutividade hidráulica neste plano é o cubo da sua espessura, sendo g a aceleração da gravidade:

$$kf = \frac{ge^3}{12\mu} \quad (3)$$

A determinação do coeficiente de permeabilidade *in situ* é realizada através dos ensaios de perda d'água (EPA) ou ensaios tridimensionais. A pressão de água na base das barragens de concreto favorece o efeito da subpressão, a qual age no sentido de reduzir o peso do barramento, tornando-o menos estável (GUTSTEIN, 2005).

Segundo Levis (2006), no estudo da estabilidade de barragens as únicas variáveis que podem ser modificadas pelo projetista são o peso da estrutura, a resultante da subpressão e a área de contato. Reduzindo-se a resultante da subpressão, reduz-se o consumo de concreto e permite-se obras economicamente mais



interessantes.

A diminuição do efeito da subpressão pode ser realizada pela inclusão de furos de drenagem vertical da fundação do barramento, sendo um dos métodos mais eficazes para este fim, afirmado por Andrade (1988).

2.2 Tratamento de Fundações

Os tratamentos de fundação convencionalmente utilizados são as cortinas de injeção com calda de cimento e, as cortinas de drenagem vertical.

A discussão a respeito da necessidade de utilizar cortinas de injeção como tratamento acontece desde 1932, em que Terzaghi contestava o uso indiscriminado das injeções, salientando meios mais eficazes e econômicos disponíveis (COSTA, 1991). Costa (1981) pontua os critérios para determinação da necessidade ou não das cortinas de injeção, sendo que apenas o método de Lugeon, de 1933 e o método de Vitor de Melo, de 1969, consideram as dimensões do barramento na tomada de decisão.

O critério dominante na definição de injetabilidade dos maciços rochosos é referente ao coeficiente de permeabilidade, em que Costa (2012) indica para $k < 10^{-5}$ cm/s, não há necessidade de execução de cortinas de injeção. A proposição do autor corrobora com Mesquita (2008), que afirma que este valor de coeficiente de permeabilidade é indicativo de maciços de condutividade muito baixa.

As cortinas de injeção impermeabilizantes são executadas em fiadas, com número de linhas variando para cada projeto. O método usualmente adotado para o tratamento é o de Houlby (1990), o qual recomenda a abertura dos furos de forma *split-spacing* e controle de parada por nega.

Levis (2006) recomenda que a distância dos furos primários deve ser menor que duas vezes o raio da seção circular de influência da injeção, sendo estes furos o suficiente para o fechamento da cortina. Os furos secundários, seriam uma

verificação e complementação do que foi realizado.

As caldas de cimento utilizadas para injeção possuem relação A/C variando de 0,5:1 a 1:1. As caldas mais grossas (0,5:1) possuem comportamento binghamiano, e com isso, maior coesão, que é uma resistência à fluência. As caldas mais finas (1:1) possuem comportamento newtoniano, com reologia comandada pela viscosidade (LOMBARDI; DEERE, 1993).

Lombardi e Deere apresentaram em 1993 o método GIN - *Grouting Intensity Number*, com o objetivo de uniformizar o traço da calda de injeção, utilizando uma mistura única. Brandão (2014) afirma que o GIN é uma metodologia prática, desenvolvida para aplicação em misturas de cimento que apresentam coesão ou seja, comportamento binghamiano. A coesão deixa as caldas mais estáveis, necessitando de pressão maior para garantir a penetrabilidade, a qual pode ser melhorada com a adição de aditivos superplastificantes.

O principal objetivo do GIN, segundo Lombardi (2003) é limitar a pressão de injeção, prevenindo uma combinação excessiva de volumes de calda e pressões elevadas que podem provocar o fissuramento hidráulico. A determinação da curva GIN é dada pela Equação 4, em que p é a pressão de injeção e V o volume injetado. A Figura 1 apresenta a curva GIN.

$$GIN = pV \text{ (kPa x l/m)} \quad (4)$$

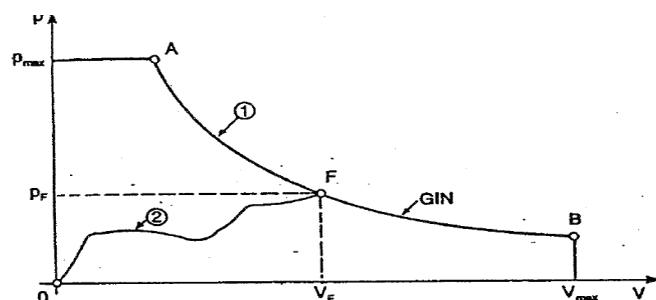


Figura 1. Representação da curva GIN (LOMBARDI; DEERE, 1993).

No Brasil, esta metodologia foi utilizada na



UHE Marechal Mascarenhas de Moraes com auxílio de um equipamento para monitoramento em tempo real, desenvolvido por Furnas (OLIVEIRA *et al.*, 2001), com resultados positivos, afirmando que o método possui vantagens, e que necessita de aprofundamento de estudo.

3 ESTUDO DE CASO

A Usina Hidrelétrica de Jirau foi construída a 120 km da capital do estado de Rondônia, Porto Velho, próximo ao distrito de Jaci Paraná, em uma ilha do Rio Madeira, denominada de Ilha do Padre. Segundo ESBR (2017), a usina tem capacidade de geração de 3750 MW, energia capaz de abastecer mais de 10 milhões de residências.

O complexo da UHE Jirau é formado por estruturas de concreto (casas de força, vertedouro e tomada d'água), terra (barragens), enrocamento-terra (barragem) e enrocamento-asfalto (barragem principal). O vertedouro possui capacidade de vazão de 82600 m³/s, com dezoito vãos e comprimento de soleira de 64 m. A Figura 2 apresenta uma imagem área do vertedouro, vista de jusante.



Figura 2. Vista de jusante do vertedouro durante a construção.

A usina opera com cota de 90 m (montante) e 70 m (jusante). O reservatório atinge uma área de 361,6 km² (ESBR, 2017), fazendo parte das novas concepções de barramentos, as quais

utilizam turbinas do tipo bulbo, compostas por eixo e gerador horizontal (SILVA, 2014).

Na região do empreendimento, encontram-se granitos da formação da Suíte Intrusiva São Lourenço-Caripunas, com estruturas de deformação pouco expressivas. Na região da Ilha do Padre, encontram-se descontinuidades formadas por zonas de cisalhamento subhorizontais, denominadas de Dx (ESBR, 2009a).

Em superfície, o maciço granítico apresenta-se muito fraturado e pouco alterado. As principais descontinuidades do vertedouro são direcionadas em N20E/84SE (paralela ao fluxo do rio) e N84W/85NE (perpendicular ao fluxo do rio) com superfícies rugosas e preenchimento milimétrico de mineral verde (ESBR, 2009c). Comparadas à estas, as descontinuidades Dx (também paralelas ao fluxo do rio), são menos frequentes, porém são mais abertas e mais alteradas que as duas outras famílias, comprometendo a percolação da calda de cimento das cortinas de injeção. A Figura 3 apresenta o estereograma da fundação do vertedouro de Jirau.

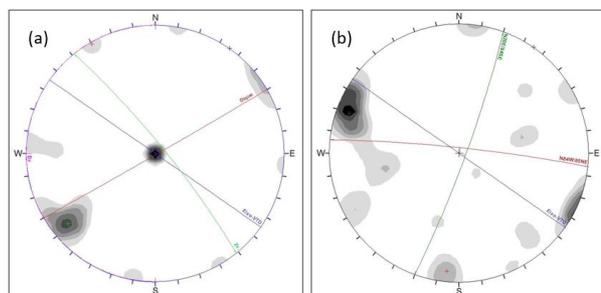


Figura 3. Estereograma da fundação do vertedouro de Jirau (ESBR, 2009c).

O tratamento de fundação foi executado pelo método convencional de Houlby (1990), com abertura de furos de forma split-spacing, com furos primários, secundários e terciários obrigatórios, espaçados a cada 3 m. A linha de furos obrigatórios fica disposta no paramento montante da galeria do vertedouro, com profundidade de 20 m (vertical) e inclinação de



20°/montante. As linhas central e jusante, com mesma profundidade, mas inclinadas a 15° e 10°, respectivamente, foram destinadas para furos eventuais.

A abertura dos furos eventuais obedeceu o critério de consumo de calda de 30 kg/m, caracterizando uma condutividade baixa, com coeficiente de permeabilidade variando entre 10^{-5} a 10^{-4} cm/s (ESBR, 2009b). Utilizaram-se caldas com A/C de 0,5:1 e 0,7:1, sem aditivos. Ensaio EPA foram executados nos furos primários intercalados, a cada 24 m, seguindo o Boletim 02 da ABGE (OLIVEIRA *et al.*, 19875).

Os furos de drenagem foram dispostos a jusante da galeira, verticais, com 20 m de profundidade, espaçados a cada 3 m. Os furos de injeção foram abertos de forma rotopercussiva, com 76 mm de diâmetro. Já, os furos de drenagem, também foram executados de forma rotopercussiva, com diâmetro de 90 mm.

O sistema de vedação da UHE Jirau foi estudado em 2015, verificando a condição de permeabilidade do maciço rochoso antes e depois da execução da cortina de injeção. Concluiu-se que o maciço rochoso possuía antes do tratamento, condutividade hidráulica de 10^{-5} cm/s, e depois do tratamento este valor diminuiu para 10^{-6} cm/s. Esses resultados indicam a boa característica hidráulica do maciço de fundação, podendo ser otimizado o seu tratamento (LOPES, 2015).

4 METODOLOGIA DA PESQUISA

4.1 Modelo de Tratamento Otimizado (MTO)

Através dos resultados da avaliação da condutividade hidráulica antes e depois do tratamento no projeto original de Jirau (Lopes, 2015), idealizou-se um modelo otimizado (MTO). Esta idealização teve por objetivo reduzir o número de furos da cortina de injeção,

aumentando o espaçamento entre furos, e, aumentar os furos de drenagem com a redução do seu espaçamento. A ordem dos furos obrigatórios passou a ser primários e secundários, espaçados a cada 6 m, e os furos de drenagem, espaçados a cada 1,5 m.

A injeção destes furos foi estudada pelo método GIN, através de retroanálise dos consumos de calda originais, determinando uma calda única para todo o projeto. Os volumes das caldas de A/C 0,5:1 e 0,7:1 foram plotados em gráficos de dispersão, juntamente com os dados de pressão. Traçaram-se três curvas GIN aleatórias, escolhendo-se para cada bloco do vertedouro, a curva que mais aproximava dos pontos dispersos.

O volume máximo para limitação das curvas foi determinado para cada bloco da estrutura, em virtude dos volumes reais injetados na cortina, em unidades de l/m. A pressão máxima adotada seguiu a recomendação de Lombardi (1996) de que a pressão máxima deve variar entre duas a três vezes a pressão hidráulica que o maciço está submetido. Por fim, determinou-se um traço único para a cortina.

4.2 Análise da Subpressão

A subpressão na base do vertedouro foi determinada pelo critério da Eletrobrás (2003) e Andrade (1988), considerando o Projeto Original e MTO.

No critério da Eletrobrás (2003), o diagrama de subpressão foi determinado a partir das Figuras 4 e 5, considerando drenagem operante e inoperante. No segundo caso, na existência de uma linha de drenos operantes, a subpressão média foi calculada pelas Equações 5 e 6.

$$H_{dm} = H_j + \frac{1}{3}(H_m - H_j) \text{ para } H_j \geq h_g \quad (5)$$

$$H_{dm} = h_g + \frac{1}{3}(H_m - h_g) \text{ para } H_j < h_g \quad (6)$$

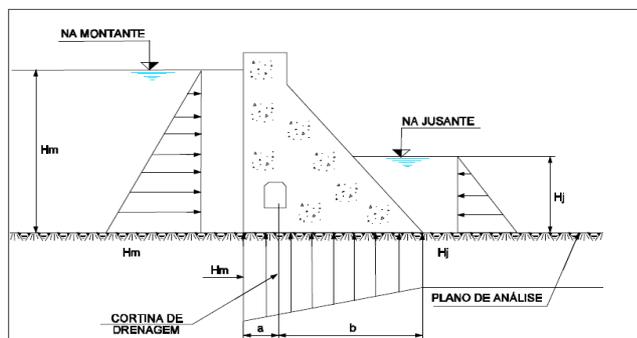


Figura 4. Subpressão com uma linha de drenagem inoperante na montante do barramento (ELETROBRÁS, 2003).

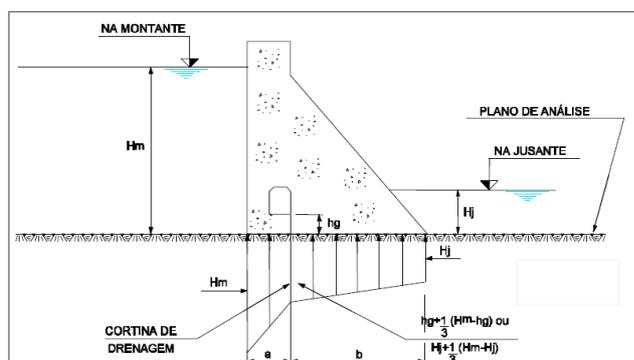


Figura 5. Subpressão com uma linha de drenagem operante na montante do barramento (ELETROBRÁS, 2003).

No método de Andrade (1988), a subpressão média na boca do dreno foi dimensionada pela Equação 7, em que j e d são as distâncias do dreno até os paramentos de montante e jusante, Hd a carga hidráulica na boca do dreno, λ o fator de forma da drenagem, e o espaçamento entre os furos, ϕd o diâmetro e, B a dimensão da base da barragem. As subpressões montante e jusante foram mantidas conforme a metodologia da Eletrobrás (2003).

$$Sd = \frac{(Hm \cdot j) + (Hj \cdot d) + (j \cdot d \cdot \lambda \cdot Hd)}{(j \cdot d \cdot \lambda) + B} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{e \ln\left(\frac{e}{\pi \phi d}\right)} \quad (8)$$

Foram dimensionadas as subpressões na base do vertedouro para suas situações: a primeira para as cotas de operação normal, com nível de montante de 90 m e jusante, 73 m. A segunda situação, tomaram-se leituras de piezometria após o enchimento do reservatório em 2013, com nível de montante na cota 84,4 m e jusante, 74,2 m. A partir dos diagramas na base, determinou-se a resultante de subpressão para cada caso, verificando a eficiência do MTO.

4.3 Características geológicas e de escoamento

Considerando que todo o escoamento da fundação se dá pelas descontinuidades, o coeficiente de permeabilidade oriundo dos ensaios de EPA, denominado de kx é igual ao kf citado na Equação 3. Utilizou-se como kx o menor valor dos horizontes ensaiados ao longo da fundação do vertedouro, permitindo a determinação da espessura da fratura portadora d'água e , e o número de Reynolds da Equação 2.

5 ANÁLISES E RESULTADOS

5.1 Modelo de Tratamento Otimizado (MTO)

A Figura 6 apresenta o gráfico de dispersão com curvas GIN para o bloco VT-02, e a Figura 7, a curva escolhida, com intensidade 1500 kPa x l/m.

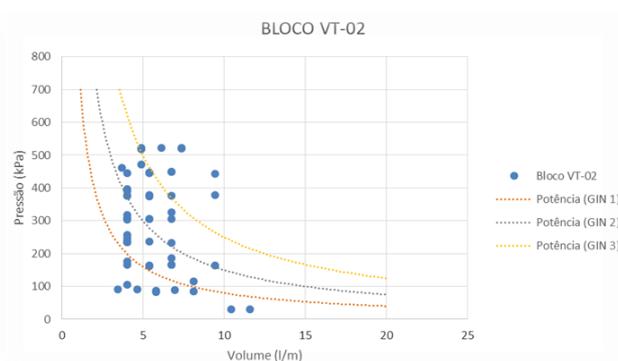


Figura 6. Curvas GIN para o bloco VT-02.

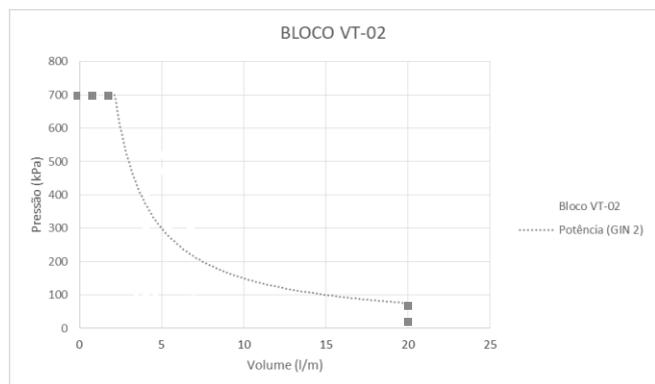


Figura 7. Curva GIN para o bloco VT-02.

A pressão máxima para construção das curvas foi baseada na proposição de Lombardi (1996), de até três vezes a pressão de água a montante (P_w). Para esta pesquisa, a relação adotada foi de $2,5 \times P_w$, uma vez que nenhum dos resultados do gráfico de dispersão alcançaram as magnitudes de $3 \times P_w$. O volume máximo de cada curva, corresponde ao volume real injetado, variando para cada bloco do vertedouro. A Tabela 1 apresenta as intensidades (GIN) para cada bloco.

Tabela 1. Resumo dos números GIN para cada bloco

Bloco	Pmax (kPa)	Vmax (l/m)	GIN (kPa x l/m)
VT-01	700	20	2000
VT-02	700	20	1500
VT-03	700	40	1500
VT-04	700	50	1500
VT-05	700	350	2000
VT-06	700	600	3000
VT-07	700	750	7000
VT-08	700	450	3000
VT-09	700	250	2500
VT-10	700	160	2000

O traço unificado da calda do MTO foi determinado pela equivalência dos volumes de água e cimento para as relações A/C do projeto de 0,5:1 e 0,7:1, sendo que a maior parte da cortina foi executada com a calda mais fina. A

mistura única manteve-se com traço de 0,7:1 igualmente ao Projeto Original. Segundo Brandão (2014), para o método GIN, as relações indicadas variam de 0,6:1 a 0,8:1, devido a maior estabilidade.

Como as cortinas de injeção têm função de reforçar o maciço rochoso nas regiões mais fraturadas, a escolha de caldas mais finas faz com que os parâmetros mecânicos sejam reduzidos (σ_c = Tensão de compressão; E = Módulo de Young) na região injetada. Para estas relações, com cimento CP IV, a resistência à compressão aos 28 dias foi de 27 e 13 MPa para 0,5:1 e 0,7:1, respectivamente. O módulo de Young foi de 5,7 e 1,6 GPa, também para mistura 0,5:1 e 0,7:1. A diminuição na resistência à compressão foi de 52% e, para o módulo de deformabilidade, 72%.

Em relação aos números GIN propostos para o MTO, estes são coerentes com os resultados de permeabilidade apresentados por Lopes (2015), mantendo maior intensidade nos blocos de condutividade maior, e menor intensidade e volume nos blocos com baixa condutividade.

Estabelecendo uma avaliação financeira da atividade de injeção, como o MTO desprezou a execução dos furos terciários (uma vez que no projeto original estes furos não apresentaram consumos superiores aos limites do projeto de 30 kg/m), houve redução na perfuração e consumo de cimento da cortina. A diminuição dos consumos de cimento injetados implica em uma redução de 30% no custo final do tratamento de vedação.

Outro objetivo do MTO é aumentar os furos de drenagem para redução do efeito da subpressão na base da barragem. A redução da resultante da subpressão, permite a redução do peso e área do concreto, viabilizando economicamente o projeto. Nesta pesquisa, os furos de drenagem foram aumentados, o que provoca também aumento no custo da perfuração deste sistema. Analisando-se o custo de todo o tratamento (cortina de injeção e sistema de drenagem), há uma elevação no



custo final de 13%.

Ressalta-se que o aumento no custo final do tratamento de fundação devido a cortina de drenagem precisa ser comparado com a possível redução do volume de concreto da estrutura, o que torna benéfica a utilização do MTO. O método GIN possui vantagens em relação ao método convencional por evitar o fissuramento hidráulico e unificar a mistura utilizada no processo de injeção, porém seus estudos e aplicações no Brasil precisam ser aprimorados.

5.2 Análise da Subpressão

Os diagramas de subpressão pelos métodos da Eletrobrás (2003) e Andrade (1988) são apresentados nas Figuras 8 e 9. Os resultados da Figura 8 referenciam-se às cotas de 90 m e 73 m dos reservatórios montante e jusante, respectivamente. Os resultados da Figura 9 basearam-se às cotas 84,4 m e 74,2 m dos reservatórios montante e jusante, incluindo-se as leituras piezométricas de 2013 após a geração da primeira turbina e nível mínimo de operação.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados de subpressão e resultante de subpressão para cada análise efetuada. As cargas de água na montante e jusante, para todos os casos estudados, seguiram as indicações de Eletrobrás (2003). A variável foi o dimensionamento das cargas médias no sistema de drenagem, em que os diagramas Projeto Original e MTO foram determinados pelo método de Andrade (1988) e o diagrama Eletrobrás (2003) pelo seu próprio critério. As cortinas de injeção não foram consideradas nesta avaliação.

Tabela 2. Resultados de subpressão – cotas máximas

Diagrama	Montante (m)	Dreno (m)	Jusante (m)	U (kN/m)
Dreno Inoperante	28		19	1678
MTO	28	4,4	19	897
Projeto Original	28	7,1	19	996
Eletrobrás	28	22	19	1486

Tabela 3. Resultados de subpressão – cotas mínimas

Diagrama	Montante (m)	Dreno (m)	Jusante (m)	U (kN/m)
Dreno Inoperante	22,4		20,2	1528
MTO	22,4	4	20,2	906
Projeto Original	22,4	6,2	20,2	980
Eletrobrás	22,4	20,9	20,2	1469
Piezometria	6,4	5,3		

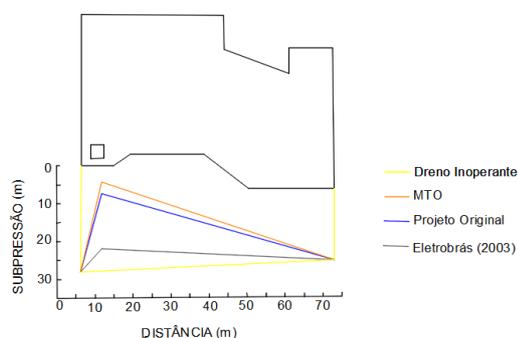


Figura 8. Diagrama de subpressão em condições normais de operação – cotas máximas.

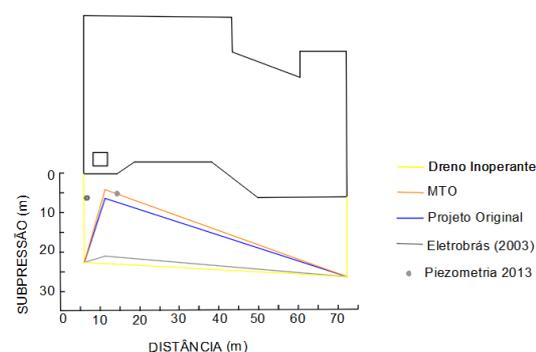


Figura 8. Diagrama de subpressão em condições normais de operação – cotas mínimas.

Comparando-se o MTO com o projeto original, o aumento do número de furos de drenagem, com conseqüente redução do espaçamento reduz o efeito da subpressão em 10% para as cotas máximas e, 8% nas cotas



mínimas. Em relação ao maciço natural (sem cortina de drenagem ou sistema inoperante), a redução para as cotas máximas é 46% e 41% para o MTO e Projeto Original, respectivamente. A modificação da linha de drenagem é eficiente, considerando que a alteração no espaçamento afeta diretamente o fator de forma λ , que é inversamente proporcional à subpressão. Para esta pesquisa, os fatores de forma encontrados foram 0,83 e 2,5 para o Projeto Original e MTO.

5.3 Características geológicas e de escoamento

A Tabela 4 apresenta as características da descontinuidade principal e suas propriedades de escoamento.

Tabela 4. Características geológicas e de fluxo

Projeto	Espessura (mm)	Velocidade (m/s)	Re
Projeto Original	11	4×10^{-6}	$8,7 \times 10^{-8}$
MTO	11	$4,6 \times 10^{-6}$	$9,9 \times 10^{-8}$

A partir dos resultados da Tabela 4, conclui-se que a espessura da maior descontinuidade da fundação do vertedouro é 11 mm, por onde o escoamento da água é realizado. Consequentemente, o número de Reynolds possui pequena magnitude, confirmando o escoamento laminar para este trabalho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A execução de uma cortina de injeção otimizada reduz os custos do tratamento de vedação em virtude da diminuição das perfurações e consumo de cimento. Para assegurar que o tratamento seja eficiente, sendo possível executar apenas os furos primários e secundários como obrigatórios (excluindo-se os terciários), é indispensável uma investigação geológico-geotécnica efetiva e de qualidade.

O aumento do número de furos de drenagem encarece o custo do tratamento de fundação, porém, com a redução dos efeitos de subpressão, o volume de concreto utilizado na estrutura também pode ser reduzido, estabilizando os custos aumentados da perfuração.

Para um maciço de fundação com baixa condutividade hidráulica, como é o caso da UHE Jirau, as cortinas de injeção diminuem simbolicamente a velocidade e vazão do escoamento. Isso reafirma a manutenção de apenas furos primários e secundários como obrigatórios, mantendo os terciários e eventuais para os casos de consumo acima do limite de projeto.

Não é possível comprovar nesta pesquisa a eficiência do GIN comparado com o método convencional de execução de injeção, salientando que as curvas foram traçadas com quantitativos reais, por retroanálise. Esta metodologia apresenta vantagens como unificação da calda, evitando a abertura demasiada das descontinuidades. Porém, no Brasil, é necessário avançar os estudos e aplicação para comprovação da eficácia. Salienta-se que trabalhos como o de Oliveira *et al* (2001) já foram idealizados no intuito da aplicação do GIN, juntamente com monitoramento da injeção em tempo real, com bons resultados.

Os resultados da subpressão foram melhorados com o aumento do fator de forma da drenagem, uma vez que esta carga relaciona-se o gradiente hidráulico do modelo e não com o coeficiente de permeabilidade, como afirmado por Andrade (1988). Como a fundação do vertedouro possui boas características hidráulicas, a cortina de injeção auxilia apenas na velocidade e vazão do escoamento. A drenagem age independente da condição do maciço de fundação e potencializa a otimização do projeto do barramento.



AGRADECIMENTOS

À Energia Sustentável do Brasil – ESBR, pela liberação dos dados utilizados para continuidade deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Andrade, R.M. (1988). *Mecânica do escoamento em maciços fraturados*, Engevix, Rio de Janeiro, 324 p.
- Azevedo, A.A., Albuquerque Filho, J.L. (1998). Águas subterrâneas, *Geologia de Engenharia*, ABGE, São Paulo, 111-130 p.
- Brandão, A.C.M. (2014). *Tratamento de fundações da barragem do Escalão Principal do Baixo Sabor*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, 110 p.
- Costa, W. (2012). *Geologia de Barragens*, Oficina de Textos, São Paulo, 352 p.
- Costa, W. (1991). Tratamento de impermeabilização de fundações de barragens: será mesmo necessário? *XIX Seminário Nacional de grandes barragens*, CBDB, Aracajú, 315-330 p.
- Costa, W. (1981). Condicionantes estruturais no tratamento de fundações de barragens, *XIV Seminário Nacional de grandes barragens*, CBDB, Recife.
- Cruz, P.T. (2004). *100 Barragens Brasileiras*, Oficina de Textos, São Paulo, 647 p.
- Eletrobrás (2003). *Critério de projeto civil de Usinas Hidrelétricas*, CBDB, Rio de Janeiro, 278 p.
- Energia Sustentável do Brasil (2017). *A usina*, ESBR, Disponível em <http://www.energiasustentaveldobrasil.com.br/a-usina>, Acesso em 25 de abril de 2017.
- Energia Sustentável do Brasil (2009a). *Relatório Técnico nº 1020-JI2-RT-USC/GG-002-00*, ESBR.
- Energia Sustentável do Brasil (2009b). *Relatório Técnico nº 1020-JI2-RT-USC/GG-00001-00*, ESBR.
- Energia Sustentável do Brasil (2009c). *Relatório Técnico nº 1020-JI2-RT-USC/GG-00011-00*, ESBR.
- Fiori, A.P., Wandresen, R. (2014). *Tensões e Deformações em Geologia*, Oficina de Textos, São Paulo, 255 p.
- Gutstein, D. (2005). *Estudo das tensões em fundações de barragens de gravidade de concreto pelo método dos elementos finitos*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 278 p.
- Houlsby, A.C. (1990). *Construction and design of cement grouting*, John Wiley & Sons, New York, 466 p.
- Levis, S.D. (2006). *Verificação da eficácia dos sistemas de vedação e drenagem em fundações de barragens de concreto*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 195 p.
- Lombardi, G. (2003). Grouting of rocks masses, *3rd International conference on grouting and grout treatment*, New Orleans, 164-197 p.
- Lombardi, G. (1996). Selecting the grouting intensity, *International Water Power & Dam Construction*, Vol. 3, 62-66 p.
- Lombardi, G., Deere, D (1993). Diseño y control del inyectado empleando el principio “GIN”, *Water Power e Dams Construction*, México.
- Lopes, M.B. (2015). *Análise da eficiência do sistema de vedação da fundação em granito de uma barragem de concreto*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 162 p.
- Mesquita, J.B. (2008). *Maciços rochosos em projetos hidrelétricos: proposta de classificação geomecânica*, Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 287 p.
- Oliveira, D. et al. (2001). Injeção de cimento com monitoramento em tempo real, *XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens*, Fortaleza, 257-269 p.
- Oliveira, A. et al. (1975). *Ensaio de perda d'água sob pressão: Diretrizes*, ABGE, São Paulo, 16 p.